

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 44 42 023 A 1

⑳ Aktenzeichen: P 44 42 023.4  
㉑ Anmeldetag: 25. 11. 94  
㉒ Offenlegungstag: 30. 5. 96

㉓ Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**C 23 F 4/00**  
C 23 F 1/02  
H 01 L 21/308  
H 01 L 49/00  
H 04 N 1/034  
B 41 J 2/18  
B 41 J 2/14

DE 44 42 023 A 1

㉔ Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

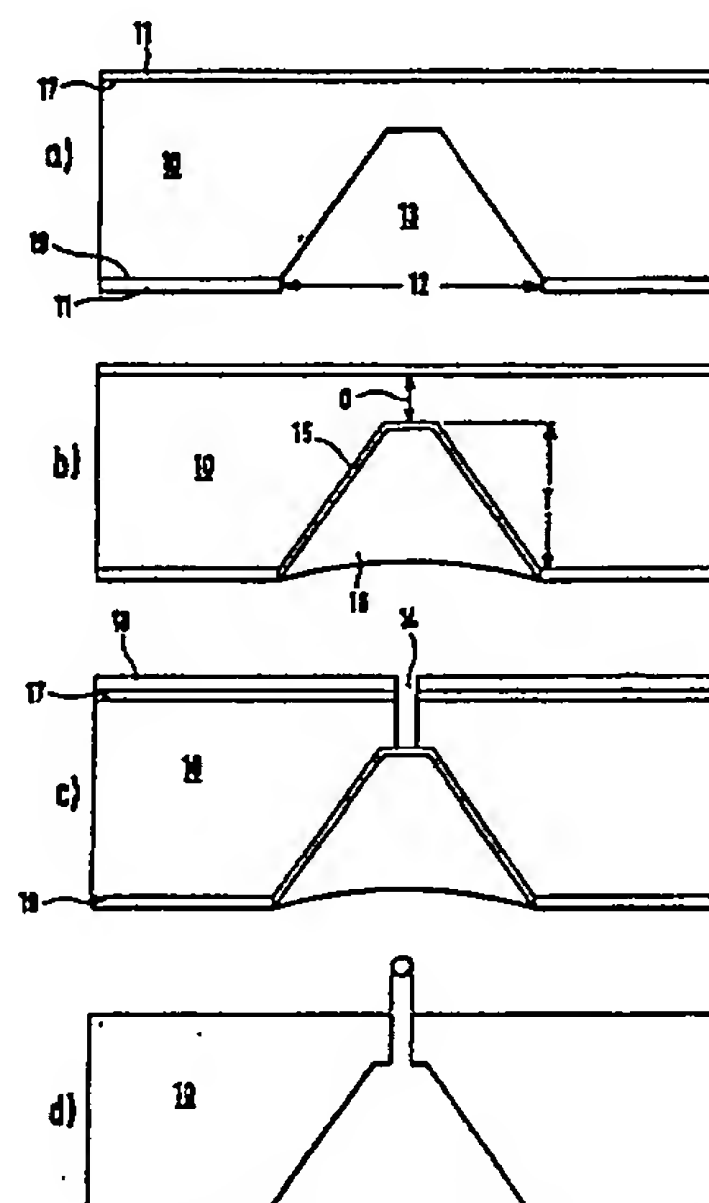
㉕ Erfinder:  
Laermer, Franz, Dr., 70437 Stuttgart, DE; Jauernig,  
Udo, Dipl.-Ing., 71229 Leonberg, DE; Schilp, Andrea,  
73525 Schwäbisch Gmünd, DE

㉖ Entgegenhaltungen:  
DE 42 41 045 C1  
DE 26 26 420 B1  
DE 40 20 724 A1  
DE 32 15 411 A1  
DE-Buch: A. Heuberger »Mikromechanik« Springer  
Verl. 1989, S. 188-190, 343-355, 392-397;  
DE-Z.: Draht 4/1993, S. 207-218;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉗ Siliziumkörper mit einem Durchbruch mit frei definierbarer Austrittsöffnung und Verfahren zu seiner Herstellung

㉘ Vorgesprochen wird ein Siliziumkörper mit einem Durchbruch mit beliebig geformter Austrittsöffnung sowie ein Verfahren zum Herstellen solcher Durchbrüche. Verfahrensgemäß erfolgt ein Teil des notwendigen Materialabtrages durch ein übliches Naßätzverfahren. Zumindest der Materialabtrag zur Erzeugung der Kontur der Austrittsöffnung (24) erfolgt durch ein Plasmatiefenätzverfahren. Vorzugsweise weist es abwechselnd Schritte zum Materialabtrag durch Ätzen und zum Passivieren der erzeugten Ätzstruktur durch Aufbringen einer Polymerschicht auf die Struktur Oberfläche auf. Vorteilhaft läßt sich die Dicke der Passivierungsschicht (11, 15) so einstellen, daß tiefer im Siliziumkörper (10) gelegene Teile der Seitenwände der erzeugten Struktur mit zunehmender Dauer des Ätzvorganges angeätzt werden, wodurch sich die erzeugte Struktur trichterförmig in den Siliziumkörper (10) aufweitet.



Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 04. 96 602 022/280

13/30

DE 44 42 023 A 1

## Stand der Technik

Die Erfindung geht aus von einem Siliziumkörper und einem Verfahren zu seiner Herstellung nach der Gattung der Ansprüche 1 und 21. Es ist bekannt, Düsen in Siliziumkörpern mit den Verfahren der Siliziummikromechanik, vor allem durch anisotropes Naßätzen herzustellen. Düsen dieser Art werden beispielsweise in Tintenstrahldruckern oder, häufig in Kombination mit einem mikromechanischen Ventil und/oder einer aktiven Pumpvorrichtung, als Einspritzdüsen in Kraftfahrzeugen verwendet. Eine wesentliche Eigenschaft des anisotropen Naßätzens in alkalischen Lösungen ist, daß die (100)-Kristallflächen schnell, die (111)-Kristallflächen dagegen nur sehr langsam geätzt werden. Die Austrittsöffnungen von so gefertigten Düsen haben dadurch grundsätzlich eine rechteckige Gestalt. Solche eckigen Austrittsöffnungen haben den Nachteil, daß sich in den Ecken Strömungsverhältnisse ausbilden, die zur Entstehung unregelmäßiger, großer Flüssigkeitstropfen führen. In Ecken kommt es ferner aufgrund des Flüssigkeitsdruckes zu Spannungskonzentrationen, welche leicht zur Bildung und Ausbreitung von Schäden, wie Rissen oder Spalten entlang der Kristallgitterrichtungen, führen. Weiterhin sind die Seitenflächen der Austrittsöffnung durch die (111)-Kristallflächen definiert, welche einen festen Winkel von  $54,7^\circ$  zur Waferebene, und damit zur Austrittsfläche aufweisen. Eine Anpassung der Seitenwandneigung an strömungsmechanische Erfordernisse ist deshalb mit den bekannten anisotropen Naßätzverfahren nicht möglich. Ein anisotropes Ätzverfahren, welches die Herstellung von Strukturen mit gegenüber der Ebene der Austrittsöffnung senkrechten Kanten gestattet, ist aus der DE-PS 42 41 045 bekannt. Das Verfahren beruht auf der wechselweisen Durchführung von Ätz- und Polymerisationsschritten. Ein jeweils in den Polymerisationsschritten erzeugter Seitenwandfilm wird dabei in den Ätzphasen vorwärtsgetrieben.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren anzugeben, das die Herstellung von Durchbrüchen durch Siliziumkörper mit beliebiger Austrittsöffnung gestattet. Desweiteren sollen Ausgestaltungen von gattungsgemäß durchbrochenen Siliziumkörpern angegeben werden, welche zur Verwendung als Einspritzdüse an Kraftfahrzeugmotoren besonders geeignet sind.

Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Hauptanspruchs. Das neuartige Verfahren macht sich die Erkenntnis zunutze, daß das aus der DE-PS 42 41 045 bekannte Verfahren neben der Erzeugung senkrecht abfallender Strukturen weiterhin die Eigenschaft besitzt, die Kontur einer Maske unabhängig von der Kristallstruktur des Siliziumkörpers nachzubilden. Um Durchbrüche mit beliebiger Austrittsöffnung zu erzeugen, wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, das aus der DE-PS 42 41 045 bekannte Verfahren mit einem bekannten naßchemischen Ätzverfahren zu kombinieren. Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich durch hohe Massenselektivität, hohe Ätzrate sowie eine kontrollierbare Anisotropie aus. Es gestattet insbesondere die Herstellung von Durchbrüchen mit kreisrunden Austrittsöffnungen. Sinnvolle Ausgestaltungen und vorteilhafte Weiterbildungen des vorgeschlagenen Verfahrens ergeben sich aus den Merkmalen der Unteransprüche.

Gemäß einer ersten Verfahrensvariante erfolgt der Materialabtrag zur Erzeugung des zu erstellenden Durchbruchs durch den Siliziumkörper zunächst von einer Durchbruchsöffnung her gemäß einem bekannten Naßätzverfahren, anschließend von der gegenüberliegenden Oberfläche her durch ein anisotropes Plasmatisierungsfenätzverfahren. Die durch das Naßätzverfahren in der ersten Verfahrensstufe erzeugte Kontur wird dabei vor Durchführung des Plasmaätzverfahrens vorteilhaft mit einem Polymermaterial aufgefüllt. Das Füllmaterial schützt die durch das Naßätzen erzeugte Struktur gegen Beschädigung nach dem Durchbruch des Materialabtrags von der gegenüberliegenden Seite. Es ermöglicht zudem eine Gaskonvektionskühlung der Waferrückseite. Bei dem aus der DE-PS 42 41 045 bekannten alternierenden Plasmaätzverfahren wird nach jedem Ätzschritt eine Passivierschicht auf die Seitenwände aufgebracht. In einer vorteilhaften Ausgestaltung wird die Dicke der Passivierschicht so eingestellt, daß die Seitenwände der geätzten Strukturen exakt von den Maskenrändern starten, dort deshalb keine Maskenunterschneidung eintritt, während tiefer im Substrat gelegene Teile der Seitenwände nicht mehr ausreichend passiviert und daher mit fortschreitender Dauer des Ätzschrittes angeätzt werden. Es entstehen auf diese Weise trichterförmige Ätzprofile.

Eine andere, den Verfahrensabschnitt des alternierenden Plasmaätzens betreffende Ausgestaltung sieht vor, das Plasmaätzen zeitweise isotrop, das heißt ohne Zwischenschaltung von Passivierschritten durchzuführen. Da der isotrope Ätzangriff unmittelbar am Maskenrand am stärksten, in die Tiefe des Durchbruchs hinein dagegen zunehmend schwächer wird, kann ein sich in die Tiefe des Siliziumkörpers verjüngendes Profil erzeugt werden. Eine gleichfalls zu einem sich in die Tiefe verjüngenden Profil führende Ausgestaltung sieht vor, die Ionenenergie der in den Plasmaätzschritten verwendeten Ionen so einzustellen, daß die Maskenränder während des Ätzprozesses kontrolliert zurückweichen.

In weiterer vorteilhafter Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Ätzverfahrens ist der zu bearbeitende Siliziumkörper in Zweilagentechnik aus zwei zunächst getrennt vorliegenden Teilkörpern aufgebaut. Dadurch können Durchbruchsstrukturen angelegt werden, welche nach dem Zusammenfügen der beiden Teilkörper innerhalb des dann resultierenden Gesamtkörpers liegen. Dies gestattet es, Durchbrüche mit kompliziertem, beispielsweise nichtrotationssymmetrischem Querschnittsprofil anzulegen. Auch können dadurch ringförmige Austrittsöffnungen erzeugt werden, was insbesondere für Einspritzdüsen für Kraftfahrzeugmotoren interessant ist. Ein geschlossener Ringspalt zeichnet sich hier durch ein besonders gutes Kraftstoffzerstäubungsverhalten aus.

Ausführungsbeispiele des vorgeschlagenen Verfahrens werden nachfolgend unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert.

## Zeichnung

Es zeigen

Fig. 1 Bearbeitungsstadien eines nach dem erfindungsgemäßen Verfahren bearbeiteten Wafers, Fig. 2 Bearbeitungsstadien bei Verwendung eines aus zwei Teilkörpern aufgebauten Siliziumkörpers, Fig. 3 ein Flußdiagramm des Verfahrens, Fig. 4 eine Austrittsöffnung in Form eines geschlossenen Ringspaltes, Fig. 5 eine Gestaltung des Einlaufbereiches, Fig. 6 und 7 wei-



tere Gestaltungen der Austrittsöffnung, Fig. 8 eine Düse mit zusätzlicher Luftumfassung, Fig. 9 eine Draufsicht auf einen Einlauf- bzw. Luftzuströmbereich.

### Beschreibung

Fig. 1 veranschaulicht anhand von vier Bearbeitungsstadien eines Wafers die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens am Beispiel der Herstellung einer Siliziumdüse mit kreisrunder Austrittsöffnung. Ein Siliziumkörper 10, im folgenden als Siliziumwafer bezeichnet, wird zunächst auf beiden Oberflächen 17, 19, im folgenden entsprechend der Wiedergabe in Fig. 1 als Oberseite 17 und Unterseite 19 bezeichnet, ganzflächig mit einer Passivierschicht 11 von Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) oder alternativ mit einer Passivierschicht von dickem thermischen Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) versehen. Auf der Unterseite 19 des so vorbereiteten Wafers 10 werden mit Hilfe eines Standardlithographieverfahrens sodann rechteckige Fenster 12 in der Passivierschicht 11 definiert. Durch ein nachfolgendes Standardätzverfahren, zum Beispiel Plasmaätzen im Falle einer Passivierschicht aus Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) beziehungsweise Plasmaätzen oder Naßätzen in wäßriger, (gepufferter) Flußsäurelösung (HF) im Falle einer Passivierschicht 11 aus Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ), werden die Fenster bis zur Siliziumoberfläche des Wafers 10 geöffnet. Anschließend wird der Wafer 10 in einer alkalischen Ätzlösung, zum Beispiel Kaliumlauge (KOH), Ethylendiamin/Pyrokatechol (EDP), oder Tetramethyl-Ammoniumhydroxid (TMAH) naßgeätzt. Unter den zuvor erzeugten Fenstern 12 entstehen dabei Materialabtragungen in Form tiefer werdender V-förmiger Gräben 13. Das Naßätzen wird fortgesetzt, bis die Grabentiefe T beziehungsweise die Dicke D der zwischen dem Boden des Grabens 13 und der Oberseite 17 des Wafers 10 verbleibenden Membran einen gewünschten Wert, welcher zum Beispiel zwischen 5 und 200 Mikrometer liegen kann, erreicht hat. Ätztiefe T beziehungsweise Membrandicke D werden über die Ätzdauer eingestellt. Ergänzend erfolgt zweckmäßig eine optische Kontrolle durch Messen der Ätztiefe und/oder Bestimmen der Membrandicke D, etwa durch Infrarot-Absorption. Zur kontrollierten Einstellung einer gewünschten Grabentiefe T kann eines der hinlänglich bekannten Ätzstopverfahren, zum Beispiel ein  $\text{P}^+$ -Ätzstop oder ein elektrochemischer pn-Ätzstop eingesetzt werden. Nach Beendigung des Naßätzens wird der Wafer 10 mit einem Standardwaferreinigungsverfahren, zum Beispiel "RCA-Clean", gereinigt, wobei Rückstände der Naßätzlösung vollständig entfernt werden. Den nach diesem Schritt vorliegenden Bearbeitungszustand des Wafers 10 zeigt Fig. 1a.

Für die Bearbeitung der Oberseite 17 des Wafers 10 wird auf die zuvor von der Unterseite 19 her erzeugte Struktur zunächst eine passivierende Schutzschicht 15 aufgebracht. Sie dient dazu, nach dem Durchbrechen des von der Oberseite 17 erfolgenden Materialabtrags durch den Boden des Grabens 13 ein Überätzen ohne Strukturverluste an den Grabenseitenwänden zu ermöglichen. Erzeugt wird die Schutzschicht 15 zweckmäßig durch thermische Oxidation der freien Siliziumoberflächen des Grabens 13. Alternativ kann sie auch durch Belegung der Oberflächen des Grabens 13 mit einem ätzplasmabeständigen Material, zum Beispiel mit einem plasmaabgeschiedenen Dielektrikum, aufgesputtertem Aluminium, Nickel oder Chrom erfolgen. Sinnvoll ist ferner, den Graben 13 anschließend zusätzlich mit ei-

nem Polymermaterial, zum Beispiel Photoresist (Photolack) vollständig aufzufüllen. Dadurch wird zum einen eine zusätzliche Passivierung der zwischen Grabenboden und Oberseite 17 verbleibenden Membranen gegenüber der Plasmaeinwirkung nach dem Durchätzen von der Oberseite 17 her erreicht. Zum anderen bewirkt das Polymermaterial eine druckdichte Isolation der Unterseite 19 zum Plasmaraum oberhalb der Oberseite 17 hin. Dadurch wird es möglich, die Unterseite 19 des Wafers während des Ätzens der Oberseite 17 mittels Gaskonvektionskühlung zu kühlen, zum Beispiel mit unter Überdruck gegenüber dem Plasmaraum an der Unterseite 19 entlanggeleitetem Heliumgas. Der in diesem Stadium vorliegende Bearbeitungszustand des Wafers 10 ist in Fig. 1b wiedergegeben.

Auf die noch unbearbeitete Waferoberseite 17 wird sodann in einem zweiten Photolithographieschritt eine Photolackmaske 18 angeordnet. Ihre Öffnungen 14 sind exakt auf die V-Gräben 13 der Unterseite 19 des Wafers justiert. Die Öffnungen 14 können beliebig gestaltet, zum Beispiel kreisrund sein. Die Justierung der Maske 18 zur Waferunterseite 19 erfolgt mit einem doppelseitigen Waferbelichtungsgerät. Alternativ kann ein einseitiges Waferbelichtungsgerät eingesetzt werden, welches auf dafür bestimmte, durchgehende Lasermarkierungen oder zuvor von der Waferunterseite 19 bis zur Waferoberseite 17 durchgeätzte Justierstrukturen ausgerichtet wird. Eine weitere Möglichkeit ist das Justieren mit Infrarotdurchlicht. Dabei wird die Maske 18 auf die Membran zwischen Grabenboden und Oberseite justiert. Alle diese Justiertechniken sind in der Fachwelt sicher beherrschte Verfahren und werden deshalb hier nicht weiter erläutert. Nachfolgend wird die in den durch die Photolackmaske 18 definierten Öffnungen 14 verbliebene Passivierschicht 11 von thermischem Oxid ( $\text{SiO}_2$ ) bzw. Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) entfernt. Das Entfernen erfolgt zweckmäßig wiederum durch ein Standardätzverfahren, wie etwa durch Plasmaätzen (RIE).

Die daraufhin in den Öffnungen 14 vorhandenen blanken Siliziumflächen werden sodann gemäß einem geeigneten Plasmaätzverfahren, vorzugsweise dem aus der DE-PS 42 41 045 bekannten, geätzt. Dieses bekannte Verfahren beinhaltet alternierend Ätzschritte, in denen Silizium abgetragen wird, und Passivierschritte, in denen die Seitenwände der erzeugten Struktur mit einer Passivierschicht, zum Beispiel durch teflonartige Polymere, bedeckt werden. Bedingt durch ein — gewolltes — Nachrutschen der seitlichen Passivierschicht in Richtung auf den jeweiligen Ätzgrund während der Ätzschritte bleiben die Seitenwände stets gegen Ätzeinwirkung geschützt. Bei richtiger Prozeßführung tritt keinerlei Unterschneidung der Maske 18 ein, die erzeugten Seitenwände sind glatt und völlig senkrecht zur Oberfläche 17. Wegen weiterer Einzelheiten zur Durchführung dieses Verfahrens wird auf die DE-PS 42 41 045 verwiesen. Das Plasmatiefenätzen liefert, ausgehend von der Oberseite 17 einen sich bis zum Boden des Grabens 13 erstreckenden, röhrenförmigen Durchbruch, dessen Seitenwände achsparallel verlaufen, und dessen Querschnittskontur genau der durch die Maske 18 definierten entspricht. Der nach Durchführung beider Verfahrensstufen insgesamt entstandene Durchbruch besitzt im Ausführungsbeispiel die Form eines Trichters mit zylindrischem Hals. Dabei weist die Austrittsöffnung an der Unterseite 19 eine eckige, beispielsweise quadratische Kontur auf, während die Austrittsöffnung zur Oberfläche 17 mit hoher Genauigkeit beispielsweise

kreisrund ist. Fig. 1c zeigt den Bearbeitungszustand zu diesem Verfahrenszeitpunkt.

Eine besonders vorteilhafte Erweiterung der möglichen Ätzstrukturgeometrien bietet eine bislang ungenutzte Eigenschaft des aus der DE-PS 42 41 045 bekannten Verfahrens. Neben Strukturen mit achsparallelen Seitenwänden lassen sich durch geeignete Prozeßführung auch Strukturen mit geneigten Seitenwänden herstellen. Die Neigung der Seitenwände kann dabei über einen weiten Bereich beliebig eingestellt werden. Bei einer ersten Verfahrensvariante dieser Art ist die Dicke der in den Passivierschritten aufgetragenen Passivierschicht so gewählt, daß diejenigen Teile der Seitenwände, die nahe am Maskenrand liegen, ausreichend passiviert werden, wodurch dort im nachfolgenden Ätzschritt kein Unterschneiden eintritt, während tiefer im Siliziumkörper 10 gelegene Teile der Seitenwände nicht mehr ausreichend passiviert und daher mit fortschreitender Dauer des Ätzvorganges angeätzt werden. Es entsteht eine sich in die Tiefe trichterförmig aufweitende Ätzstruktur. Durch Steuerung der Dicke der Passivierschicht läßt sich die Seitenwandneigung einstellen.

Eine zweite Verfahrensvariante sieht vor, den Ätzprozeß nach dem anisotrop geführten Durchätzen der Membran zwischen Oberseite 17 und Boden der Struktur 13 eine bestimmte Zeit lang isotrop weiterzuführen. Hierbei ist der zuvor beschriebene Schutz der Grabenstruktur 13 vor dem Plasmaätzangriff besonders wesentlich. Da der isotrope Ätzangriff unmittelbar am Rand der Maske 18, d. h. am späteren Düsenaustritt am stärksten, in die Tiefe der Struktur 13 hinein dagegen zunehmend schwächer wird, kann ein sich in die Tiefe verjüngendes Profil kontrolliert erzeugt werden.

Eine weitere Verfahrensvariante besteht darin, durch geeignete Wahl der Ionenenergie — sie muß ausreichend groß sein — bei ansonsten anisotroper Prozeßführung eine Facettierung der Maske 18 zu erreichen, wobei die Maskenränder während des Ätzprozesses kontrolliert zurückweichen. Auch hierbei wird ein sich in die Tiefe verjüngendes Profil erreicht, ohne daß ein Unterschneiden des Maskenrandes eintritt. Besonders günstig im Zusammenhang mit einer durch Facettierung einstellbaren Seitenwandneigung ist eine Fotolackmaske 18 ohne darunterliegende Passivierschicht. Zweckmäßig werden in diesem Fall die Siliziumnitrid- und/oder Siliziumoxidpassivierschichten 11 an der Oberseite 17 des bearbeiteten Siliziumkörpers 10 vor dem zweiten Lithographieschritt ganz flächig entfernt.

Nach Abschluß des Plasmatiefenätzens werden die Passivierschichten 11, 15, sowie das in den V-Gräben 13 vorhandene Photoresist durch geeignete, naßchemische, gegenüber Silizium selektive Ätzlösungen oder Lösungsmittel entfernt. Alternativ kann das Entfernen mittels einer  $O_2$ -Plasmabehandlung erfolgen.

Eine vorteilhafte Abwandlung des vorgeschlagenen Verfahrens ist nachfolgend anhand der Herstellung einer Ringspaltdüse für das Einspritzventil eines Benzinmotors beschrieben. Fig. 2 zeigt, jeweils im Längsschnitt, vier Stadien der Herstellung einer solchen Düse. Die zugehörigen Verfahrensschritte sind in Fig. 3 als Flußdiagramm wiedergegeben.

Der Siliziumkörper, in den der Durchbruch eingebracht wird, besteht in diesem Fall aus zwei zunächst getrennt vorliegenden Wafern 10, 20, welche zu einem späteren Zeitpunkt während der Bearbeitung zusammengefügt werden. Einer dieser Wafer, der im folgenden als unterer Wafer 10 bezeichnete, wird in einem ersten Verfahrensschritt 100 thermisch oxidiert. Dabei

wird er mit einer ca. 2 Mikrometer dicken Schicht von thermischem Siliziumoxid ( $SiO_2$ ) versehen. In einem doppelseitigen Photolithographieschritt 102 werden nachfolgend mit Hilfe einer Photolackmaske 18 auf einer ersten Oberfläche 17 des Wafers 10, im weiteren als Oberseite bezeichnet, die späteren Einlaufbereiche — Drallkanäle sowie äußerer Ring — definierende Fenster angelegt. Auf der gegenüberliegenden Waferoberfläche 19, im weiteren als Rückseite bezeichnet, werden weiterhin die späteren Ringspaltöffnungen 27 angelegt. Das in den Fenstern 26, 27 vorhandene Siliziumoxid ( $SiO_2$ ) wird durch Naßätzen in wäßriger Flußsäure (HF) oder durch Plasmaätzen vollständig entfernt, Schritt 104. Weiterhin werden auch die Masken 18 entfernt. Nachfolgend wird durch Plasmatiefenätzen, z. B. gemäß dem aus der DE-PS 42 41 045 bekannten Verfahren, der Einlaufbereich von der Oberseite 17 her in den unteren Wafer 10 eingätzt. Seine Form entspricht exakt dem durch die auf der Oberseite des Wafers 10 verbliebene Siliziumoxidschicht definierten Fenster 26, welches seinerseits zuvor durch die Maske 18 definiert wurde. Die Ätztiefe entspricht im Ausführungsbeispiel etwa der halben Dicke des unteren Wafers 10. Den Bearbeitungszustand zu diesem Verfahrenszeitpunkt zeigt Fig. 2a, wobei zusätzlich die Masken 18 mitdargestellt sind.

Nach Beendigung des Plasmatiefenätzprozesses wird das restliche auf der Oberseite 17 noch vorhandene Siliziumdioxid ( $SiO_2$ ) in wäßriger Flußsäure (HF) entfernt, Schritt 108. Dabei ist die Waferunterseite 19 geschützt, die Siliziumdioxidschicht 11 soll hier erhalten bleiben. Anschließend wird der untere Wafer 10 komplett reoxidiert, Schritt 110, wobei auf alle Oberflächen eine im Vergleich zur Schicht 11 dünne Schicht 21 von thermischem Oxid ( $SiO_2$ ), im folgenden als ReOx-Schicht bezeichnet, aufgewachsen wird. Sie bedeckt insbesondere auch die Innenflächen des Einlaufbereichs 26, die zuvor gereinigte blanke Oberseite 17, sowie die in den Fenstern 27 liegende Fläche der Unterseite 19.

Nun wird ein zweiter Wafer, im folgenden als oberer Wafer 20 bezeichnet, ebenfalls zunächst mit einer Schicht 21 aus dünnem thermischem Oxid ( $SiO_2$ ) versehen, Schritt 112. Der auf diese Weise gegen das nachfolgende Plasmaätzverfahren passivierte Wafer 20 wird sodann durch Silizium-Direkt-Bonden (SFB) mit dem unteren Wafer 10 verbunden. Beide Wafer 10, 20 werden hierfür zunächst hydrophilisiert, indem sie beispielsweise in einem Gemisch von Ammoniak, Wasserstoffperoxid und Wasser vorbehandelt werden. Zum Bonden werden die hydrophilisierten Waferflächen in innigen Kontakt gebracht, wobei es durch Van-der-Waals Kräfte bereits zu einer Adhäsion kommt. In einem nachfolgenden Hochtemperaturschritt bei Temperaturen  $> 800^\circ C$  wird die Verbindung verfestigt bis zur Zerreißgrenze von thermischem Oxid, Schritt 118. Einer besonderen Justage bedarf es für das Bonden nicht.

Die verbundenen Wafer 10, 20 werden mit einer Schicht von Siliziumnitrid ( $Si_3N_4$ ) versehen, Schritt 120. Sie bildet eine gegenüber Kalilauge (KOH) besonders ätzbeständige Maskierung. Diese Beschichtung erfolgt nach einem gebräuchlichen Standardverfahren, beispielsweise als Niederdruckschichtabscheidung bei hoher Temperatur in einem Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD)-Rohr. Es folgt wiederum ein zweiseitiger Lithographieschritt, mittels dessen an der Oberseite 23 des nach dem Bonden der beiden Wafer 10, 20 erhaltenen Gesamtsiliziumkörpers die späteren Eintrittsöffnungen definierende Fenster 28 angelegt werden. Eine obere Maske 18 mit den Eintrittsöffnungen 28



wird dabei auf das in der Siliziumoxidschicht 11 bereits vorhandene, die Austrittsöffnung definierende Fenster 27 an der Unterseite 19 — sie wird durch die Unterseite des unteren Wafers 10 gebildet — justiert. Das Fenster 27 ist dabei durch die überlagerte transparente Siliziumnitridschicht 22 gut zu erkennen. Eine exakte Justage der oberen Maske 18 zu den Strukturen der Waferunterseite 19 ist damit leicht möglich.

Im nächsten Schritt 124 wird das Siliziumnitrid in den durch die Fenster 28 definierten Eintrittsöffnungen 28 der oberen Maske 18 durch Plasmatiefenätzen in einem Fluorplasma entfernt. Das darunter befindliche Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) wird ebenfalls entfernt, beispielsweise durch Naßätzen in gepufferter Flußsäure (HF), Schritt 126. Hierauf werden, vorzugsweise in heißer Kalilauge (KOH), entsprechend den Fenstern 28 Eintrittsöffnungen in den oberen Wafer 20 geätzt, Schritt 128. Die Unterseite des Siliziumkörpers 10, 20 bleibt hierbei durch die Siliziumnitridschicht 22 geschützt. Der Ätzprozeß durch den oberen Wafer 20 stoppt automatisch an der dünnen ReOx-Schicht 21, die vor dem Bonden beider Wafer 10, 20 aufgewachsen wurde. Der entstehende Durchbruch durch den oberen Wafer 20 weist, entsprechend dem gewählten Naßätzverfahren einen V-förmigen Querschnitt auf. Den Bearbeitungszustand zu diesem Verfahrenszeitpunkt zeigt Fig. 2c.

Nach Beendigung des Naßätzens, Schritt 128, wird an der Unterseite 19 des Siliziumkörpers 10, 20 die Nitridschicht 22 selektiv zur darunterliegenden ReOx-Schicht 21 bzw. dicken Siliziumoxidschicht 11 entfernt, Schritt 130. Dies kann etwa in einem Fluor-Ätzplasma oder auch naßchemisch, beispielsweise durch heiße Phosphorsäure erfolgen. Anschließend wird an der Unterseite 19, insbesondere in den Fenstern 27 der Siliziumoxidschicht 11, die dünne ReOx-Schicht 21 durch Rückätzen in gepufferter Flußsäure entfernt. Dabei kann ein leichtes Anätzen der dicken Siliziumoxidschicht 11 hingenommen werden. Mit Hilfe eines Plasmatiefenätzverfahrens, insbesondere dem aus der DE-PS 42 41 045 bekannten, wird anschließend die durch das Fenster 27 definierte Austrittsöffnung von der Unterseite 19 her in den unteren Wafer 10 eingeätzt. Als Maske wirkt hierbei die verbliebene vorstrukturierte, dicke Siliziumoxidschicht 11. Die Ätztiefe ist auf den zuvor angelegten Einlaufbereich 26 abgestimmt. Sie wird zudem durch die vor dem Bonden aufgebraachte dünne ReOx-Schicht 21 begrenzt, welche partiell als Ätzstop wirkt. Dadurch kann nach dem Auftreffen der Ätzfront auf die Struktur des Einlaufbereichs sogar ein Überätzen durchgeführt werden, ohne daß ein Ätzangriff auf die Wände der Durchbruchsstruktur erfolgt. Die Möglichkeit des Überätzens gestattet es, die Tiefe der Austrittsöffnung 27 rein zeitkontrolliert einzustellen. Im Falle des hier angenommenen Beispiels der Herstellung einer Kraftstoffeinspritzdüse kann dies dazu benutzt werden, den Kraftstoffabspritzwinkel an der Austrittsöffnung einzustellen. Der nach dem Verfahrensschritt 134 vorliegende Bearbeitungszustand ist in Fig. 2d dargestellt.

Die nach dem Plasmatiefenätzen zwischen den Teilbereichen 26, 27, 28 des gewünschten Durchbruches noch vorhandenen dünnen ReOx-Schicht-Membranen werden abschließend zum Beispiel durch kurzes Tauchen des fertigprozessierten Siliziumkörpers in verdünnter Flußsäure (HF) entfernt, Schritt 136.

Gemäß dem zuvor beschriebenen Verfahren hergestellte Einspritzdüsen können nach Vereinzeln der Wafer unmittelbar an einem Einspritzventil eingesetzt wer-

den.

Mit den vorstehend beschriebenen Verfahren läßt sich eine Vielzahl von vorteilhaften Durchbruchsgeometrien realisieren. Als besonders interessant hat sich vor allem die Zweilagentechnik zur Herstellung von Ringspalt-Einspritzdüsen für Kfz-Motoren erwiesen. Fig. 4 zeigt, entsprechend der Geometrie des Ausführungsbeispiels nach Fig. 2, in Betrachtung von der Unterseite 19 des Siliziumkörpers respektive der Düse her eine ringförmige Austrittsöffnung 27. Im Bereich des Zusammentreffens der ringförmigen Austrittsöffnung 27 mit dem im Randbereich gleichfalls ringförmig ausgebildeten Einlaufbereich 26 entsteht ein Ringspalt, durch den der Kraftstoff abgespritzt wird.

Fig. 5 zeigt eine vorteilhafte Gestaltung des Einlaufbereichs 26, das heißt derjenigen Struktur, die vor dem Bonden der beiden Siliziumwafer 10, 20 in den unteren Siliziumwafer 10 eingeätzt wird. Er besteht aus vier, jeweils vom Zentrum nach außen gekrümmten Drallkanälen 29, welche in eine ringförmig gestaltete Austrittsöffnung 27 münden. Am Außenrand der Öffnung 27 ist ein Ringspalt 30 ausgebildet. Im Zentrum der Struktur befindet sich die quadratische Eintrittsöffnung 28. Der durch sie in den Einlaufbereich eintretende Kraftstoff erhält durch die Drallkanäle 29 sowohl eine rotatorische als auch eine horizontale Geschwindigkeitskomponente. Dadurch wird Zerstäubung des Kraftstoffes in den Verbrennungsraum am Ringspalt 30 begünstigt. Bei einem Muster betrug die Kantenlänge der Eintrittsöffnung 28 379  $\mu\text{m}$ , der Durchmesser der Austrittsöffnung 27 1400  $\mu\text{m}$  und die Breite des Ringspaltes 26,4  $\mu\text{m}$ .

Fig. 6 zeigt eine weitere, das Zerstäubungsverhalten begünstigende Ausgestaltung der Austrittsöffnung 27. Sie besteht aus mehreren Ringsegmentspalten, die konzentrisch angeordnet sind.

Eine weitere Austrittsöffnungsgeometrie mit günstigen Zerstäubungseigenschaften zeigt Fig. 7. Die Austrittsöffnungen 27 sind hierbei als hufeisenförmige Teilkreise ausgebildet, welche entlang einer Kreislinie angeordnet sind.

Vorteilhaft ist es desweiteren, die Zerstäubung des Kraftstoffes durch Zufuhr von Luft zu unterstützen. Fig. 8 zeigt im Querschnitt eine hierfür geeignete Düsengeometrie mit Luftumfassung der Abspritzspalte. Sie weist analog zur Düse nach Fig. 2d eine Eintrittsöffnung 28, einen Einlaufbereich 26 mit Drallkanälen 29, sowie eine Austrittsöffnung 27 auf. Auch das Herstellungsverfahren entspricht dem zur Herstellung einer Düse nach Fig. 2. Bei der Bearbeitung des unteren Wafers 10, insbesondere im Rahmen des Schrittes 106 wird jedoch zusätzlich ein Luftzuströmbereich bestehend aus Luft-einlaßkanälen 31 sowie diesen nachgeordneten Luft-Drallbereichen 32 angelegt. Letztere erstrecken sich, zweckmäßig in Form eines Bogens, von den Waferseitenwänden in Richtung auf den Kraftstoff-Einlaßbereich 26. Über einen weiteren Ringspalt 33 münden die Drallbereiche 32 in die Austrittsöffnung 27. Die Lufteinlaßkanäle 31, sie dienen zur Zuführung von Luft in die Drallbereiche 32, erstrecken sich bis an den Rand des die Düse enthaltenden Chips. Zweckmäßig werden sie beim Vereinzeln der fertigen Düsen, d. h. in der Regel beim Sägen des Wafers 10, 20 eröffnet. Durch den Luftzuströmbereich 31, 32 wird, während über die Eintrittsöffnung 28 gleichzeitig Kraftstoff K in die Düse geleitet wird, Luft L zugeführt, die am Ringspalt 33 austritt. In der Austrittsöffnung 27 vermischt sich die austretende Luft L mit dem am Ringspalt 30 zerstäubten Kraftstoff K. Zur weiteren Verbesserung der Mischung von Luft L

und Kraftstoff K sind die Drallbereiche 32 zweckmäßig so ausgebildet, daß sie der hindurchströmenden Luft L eine zirkulare Geschwindigkeitskomponente aufprägen. Erreicht wird dies beispielsweise, indem die Drallbereiche 32 gekrümmt gestaltet werden.

Fig. 9 veranschaulicht in Draufsicht auf den unteren Wafer 10 eine vorteilhafte Gestaltung des Kraftstoff-Einlaufbereiches und des Luftzuströmbereiches für eine Düse gemäß Fig. 8. Nach dem Ätzen stehengebliebene Siliziumstrukturen sind dunkel wiedergegeben. In der Düsenmitte ist die rechteckige Kontur der Kraftstoff-Eintrittsöffnung 28 zu erkennen. Von dessen Rändern erstrecken sich sichelförmig gekrümmt ausgebildete Drallkanäle 29 zum Rand der Austrittsöffnung 27 mit dem inneren Ringspalt 30. Dieser und ebenso der äußere Ringspalt 33 werden durch einen, auch aus Fig. 8 ersichtlichen, Siliziumring 35 definiert, welcher sich über der Austrittsöffnung 27 befindet. In analoger Weise erstrecken sich ebenfalls sichelförmig gekrümmt ausgebildete Luft-Drallbereiche 32 vom Außenumfang 34 der Düse zum äußeren Rand der Austrittsöffnung 27 mit dem äußeren Ringspalt 33. Am Außenumfang befinden sich Lufteinlaßkanäle 31, welche mit den Drallbereichen 32 verbunden sind. Die sichelförmigen Geometrien von Drallkanälen 29 und Drallbereichen 32 sind beispielhaft, möglich sind auch beliebige andere Geometrien, etwa Geraden.

Unter Beibehaltung des der Erfindung zugrundeliegenden Verfahrenskonzepts ist eine Vielzahl sinnvoller Abwandlungen des Verfahrens möglich. Insbesondere ist die anhand der Fig. 2 und 3 beschriebene Verfahrensvariante nicht auf die Herstellung von Düsen für Kraftfahrzeugeinspritzventile beschränkt. Bestimmte Verfahrensschritte können weggelassen oder durch andere ersetzt werden. Beispielsweise kann der untere Wafer 10 im ersten Bearbeitungsdurchgang anstatt durch Plasmataiefenätzen durch Naßätzen bearbeitet werden. Ebenso ist denkbar, daß auch der obere Wafer 20 vor dem Bonden bereits mittels eines der Ätzverfahren bearbeitet wird. Weiterhin sind die für die Gestaltung des Einlaufbereichs 26 beziehungsweise der Austrittsöffnung 27 vorgeschlagenen Geometrien nur beispielhaft. Möglich sind auch beliebige andere Geometrien, die insbesondere nicht rotationssymmetrisch sein müssen. Durch geeignete Führung des aus der DE-PS 42 41 045 bekannten Verfahrens sind selbstverständlich in allen Fällen Ätzstrukturen mit kontrolliert geneigten Seitenwänden herstellbar.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines Durchbruches mit beliebig geformter Austrittsöffnung durch einen Siliziumkörper, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens ein Teil des notwendigen Materialabtrags durch ein übliches Naßätzverfahren erfolgt, und daß der Materialabtrag zur Erzeugung der Kontur der Austrittsöffnung (24) durch ein Plasmataiefenätzverfahren erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Siliziumkörper (10, 20) vor Durchführung des Plasmataiefenätzverfahrens ganz flächig mit einer gegen das Plasmaätzen schützenden Passivierschicht (11) versehen wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Passivierschicht (11) aus Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und/oder Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) besteht.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

daß die durch das Naßätzverfahren erzeugte Struktur (13) vor Durchführung des Plasmataiefenätzverfahrens durch thermische Oxidation gegenüber den nachfolgenden Ätzschritten resistent gemacht wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen der durch das Naßätzen erzeugten Struktur (13) mit einem ätzplasma-beständigen Material belegt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die durch das Naßätzen erzeugte Struktur (13) vor Durchführung des Plasmataiefenätzverfahrens mit einem Polymermaterial (16) aufgefüllt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Plasmataiefenätzverfahren abwechselnd Schritte zum Materialabtrag durch Ätzen und zum Passivieren der erzeugten Ätzstruktur durch Aufbringen einer Polymerschicht auf die Strukturoberflächen aufweist.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der passivierenden Polymerschicht so eingestellt wird, daß tiefer im Siliziumkörper (10) gelegene Teile der Seitenwände der erzeugten Struktur mit zunehmender Dauer des Ätzvorgangs angeätzt werden.

9. Verfahren nach Anspruch 7; dadurch gekennzeichnet, daß ein Teil der Ätzschritte ohne Zwischenschaltung von Passivierschritten durchgeführt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Ionenenergie bei den Plasmataiefenätzschritten so gewählt wird, daß die die Struktur definierende Maske (18) kontrolliert zurückweicht.

11. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Passivierschichten (11, 15) nach Beendigung des Plasmataiefenätzverfahrens durch ein gegenüber Silizium selektives Lösungsmittel entfernt werden.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Passivierschichten (11, 15) durch eine  $\text{O}_2$ -Plasmabehandlung entfernt werden.

13. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Siliziumkörper durch Zusammenführen zweier Siliziumteilkörper (10, 20) aufgebaut wird, wobei der Materialabtrag von der Oberfläche (19) des einen Siliziumteilkörpers (10) her durch ein Standard-Naßätzverfahren (128), von der gegenüberliegenden Oberfläche (23) des anderen Teilkörpers (20) her durch ein Plasmataiefenätzverfahren (134) erfolgt.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem Zusammenfügen des ersten Siliziumteilkörpers (10) mit dem zweiten Siliziumteilkörper (20) in die nach dem Zusammenfügen innerhalb des Siliziumkörpers liegende Oberfläche (17) des ersten Teilkörpers (10) eine Struktur (26) eingeätzt wird (106), welche später Teil des Durchbruchs (26, 27, 28) ist.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen des ersten Siliziumteilkörpers (10) vor dem Zusammenfügen thermisch oxidiert werden (110).

16. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen des zweiten Siliziumteilkörpers (20) vor dem Zusammenfügen thermisch oxidiert werden (112).



17. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen des nach dem Zusammenfügen der Siliziumteilkörper (10, 20) erhaltenen Siliziumkörpers mit Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) beschichtet werden (120). 5
18. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der nach dem Zusammenfügen der beiden Siliziumteilkörper (10, 20) erhaltene Siliziumkörper zuerst einem Materialabtrag durch ein Standardnaßätzverfahren (128), anschließend einem Materialabtrag durch ein Plasmatiefenätzverfahren (134) unterworfen wird. 10
19. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Verbindung der Siliziumteilkörper (10, 20) erfolgt, indem sie zunächst an den Verbindungsoberflächen hydrophilisiert (114), danach mit den hydrophilisierten Verbindungsoberflächen in innigen Kontakt gebracht werden (116), und die Verbindung schließlich bei erhöhter Temperatur verfestigt wird (118). 15 20
20. Siliziumkörper mit einem Durchbruch, dadurch gekennzeichnet, daß die Kontur zumindest einer Austrittsöffnung (27) gebogene und/oder von den durch das Kristallgitter festgelegten Vorzugsrichtungen abweichende Abschnitte aufweist. 25
21. Siliziumkörper nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Austrittsöffnung (27) ringförmig ausgebildet ist.
22. Siliziumkörper nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß der Übergang zwischen dem Durchbruch (26, 28) von der Eintrittsöffnung her und der Austrittsöffnung (27) als Spalt (30) mit einem im Vergleich zum Durchbruch (26, 27, 28) kleinen Strömungsquerschnitt ausgebildet ist. 30
23. Siliziumkörper nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß der Durchbruch (26, 27, 28) Bereiche (26, 29) aufweist, welche ein den Durchbruch durchströmendes Medium (K) von seiner Eintrittsrichtung ablenken. 35
24. Siliziumkörper nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß die ablenkenden Bereiche (26, 29) gerade und/oder gekrümmte Abschnitte (29) aufweisen, welche einem durchströmenden Medium (K) eine rotatorische Bewegungskomponente einprägen. 40 45
25. Siliziumkörper nach Anspruch 20, gekennzeichnet durch einen zweiten Durchbruch (31, 32) zur Führung eines zweiten Mediums (L), welcher im wesentlichen senkrecht zur Eintrittsrichtung eines Mediums (K) in den ersten Durchbruch (26, 27, 28) angelegt ist, und ebenfalls in die Austrittsöffnung (27) mündet. 50
26. Siliziumkörper nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß der Übergang zwischen dem zweiten Durchbruch (31, 32) und der Austrittsöffnung (27) als Spalt (33) mit einem im Vergleich zum Durchbruch (31, 31) kleinen Strömungsquerschnitt ausgebildet ist. 55
27. Siliziumkörper nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Durchbruch (31, 32) gekrümmte Abschnitte (32) aufweist, welche einem durchströmenden Medium (L) eine rotatorische Bewegungskomponente einprägen. 60

---

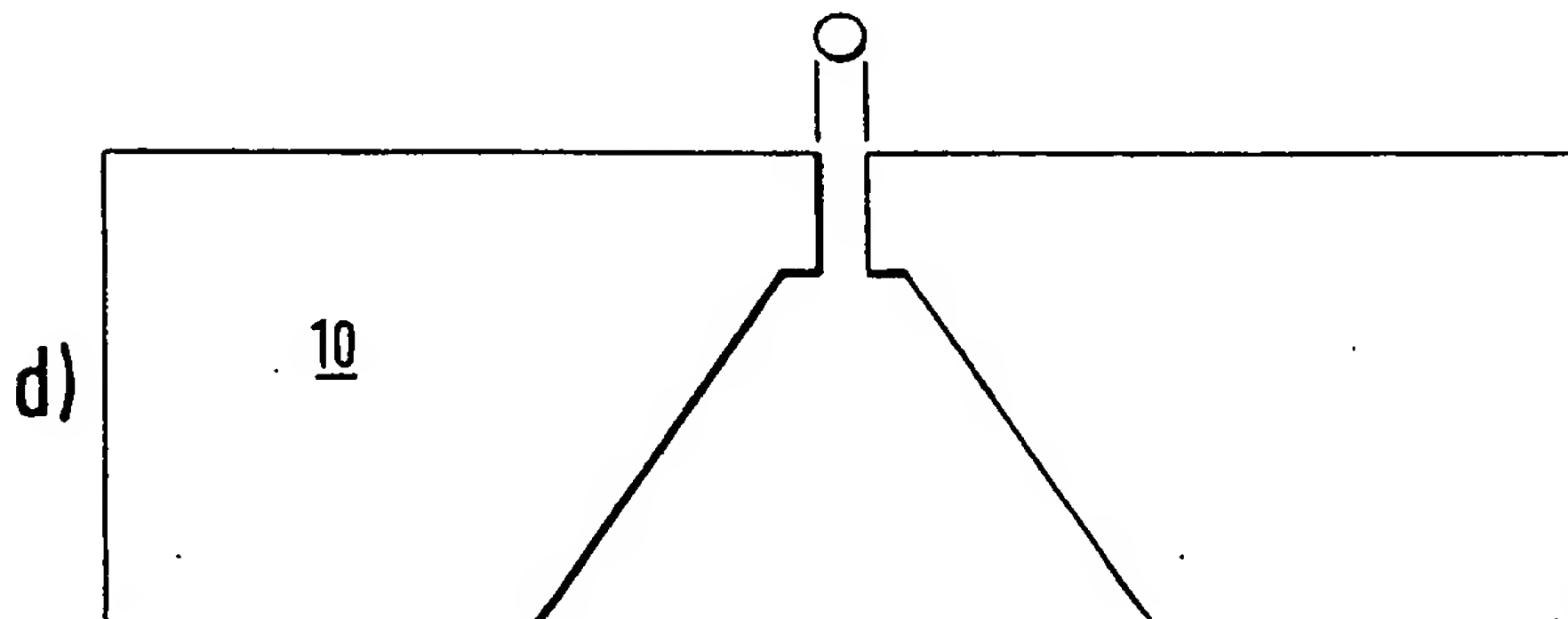
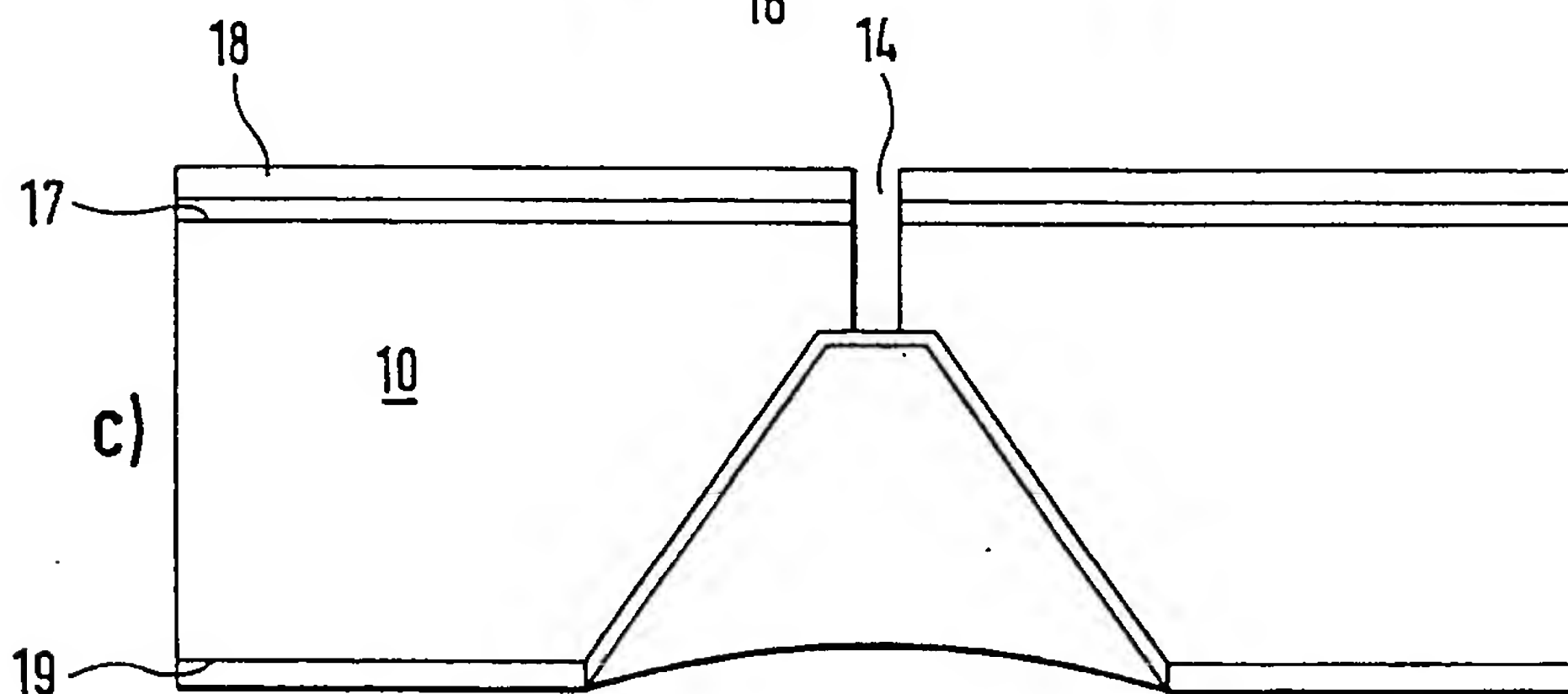
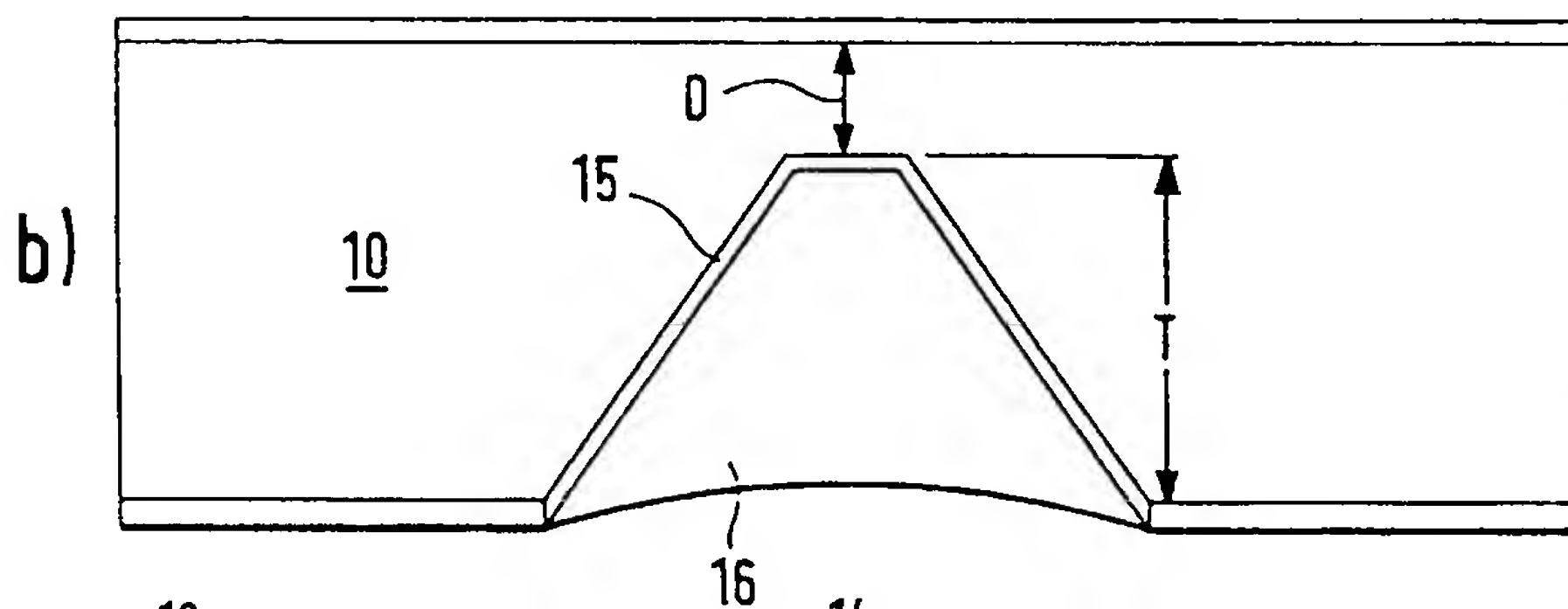
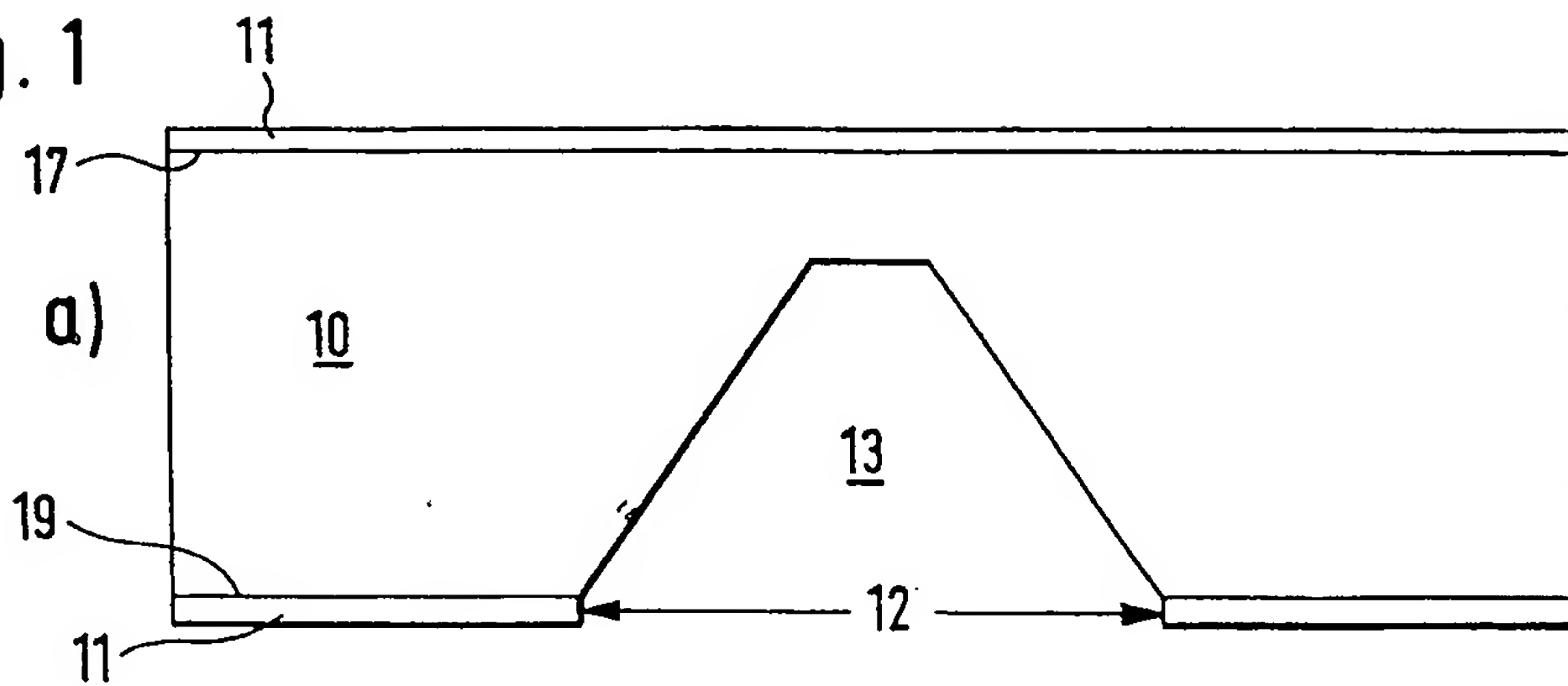
Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

65

- Leerseite -



Fig. 1



602 022/290

Fig. 2

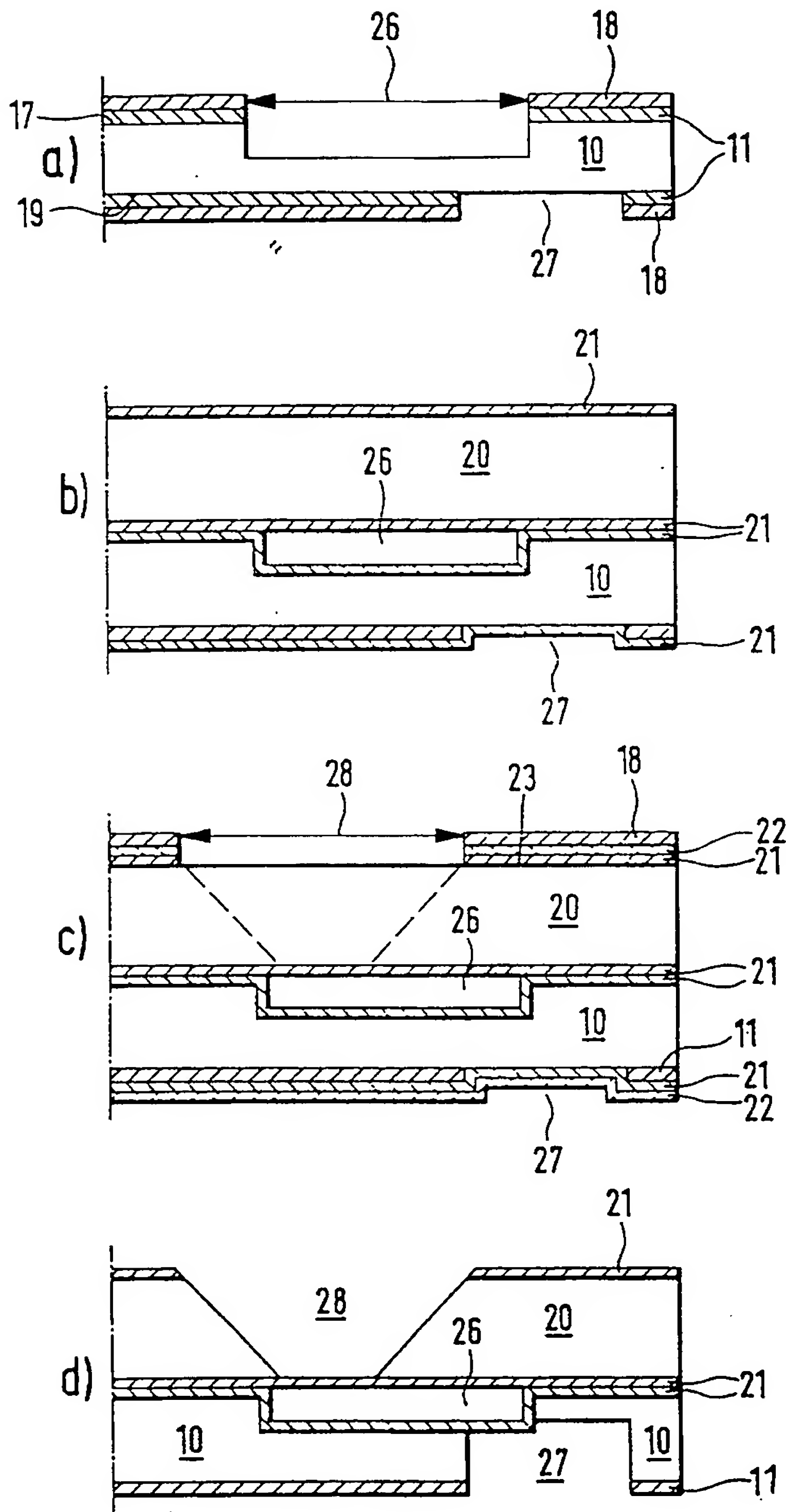
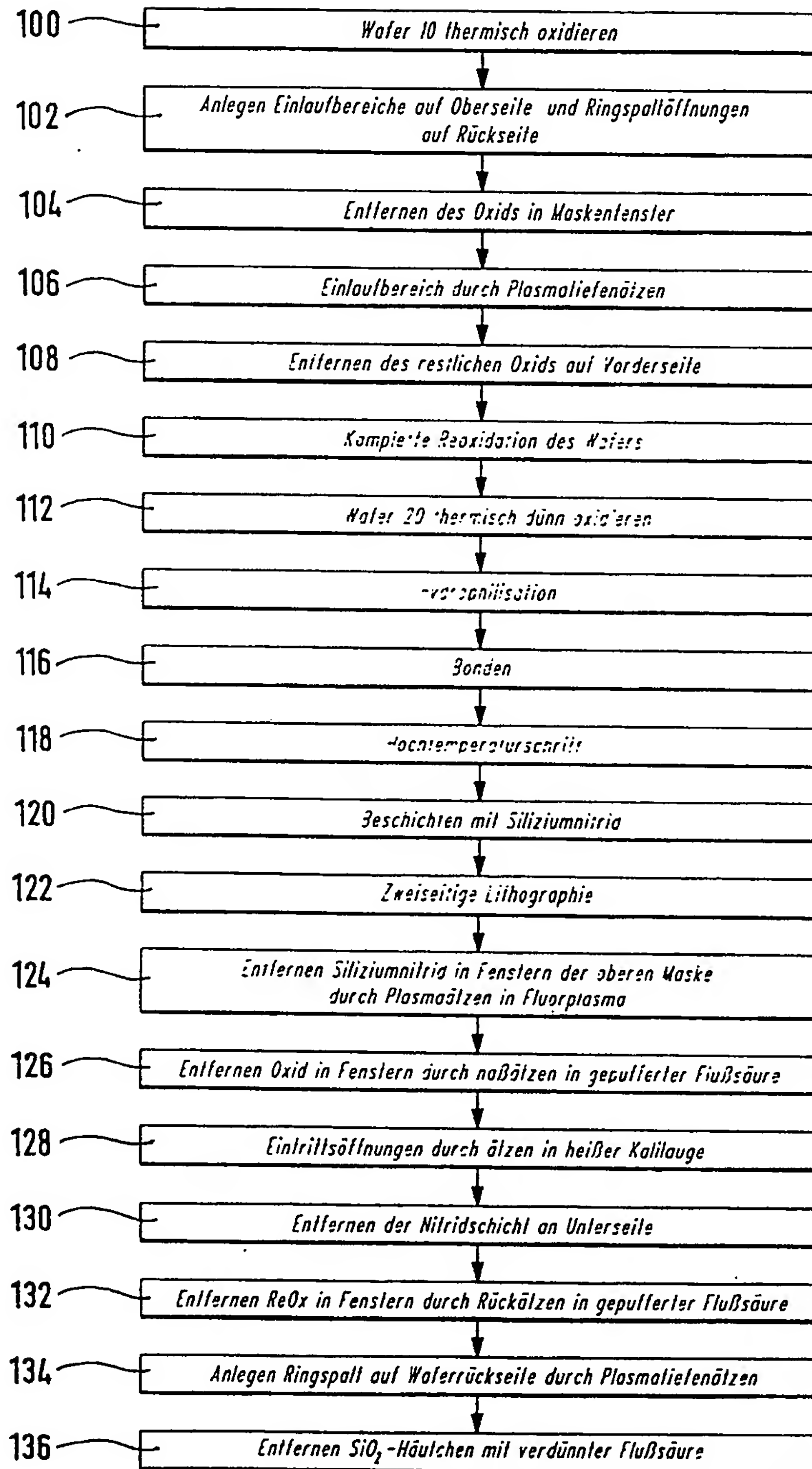


Fig. 3



602 022/290



Fig. 4

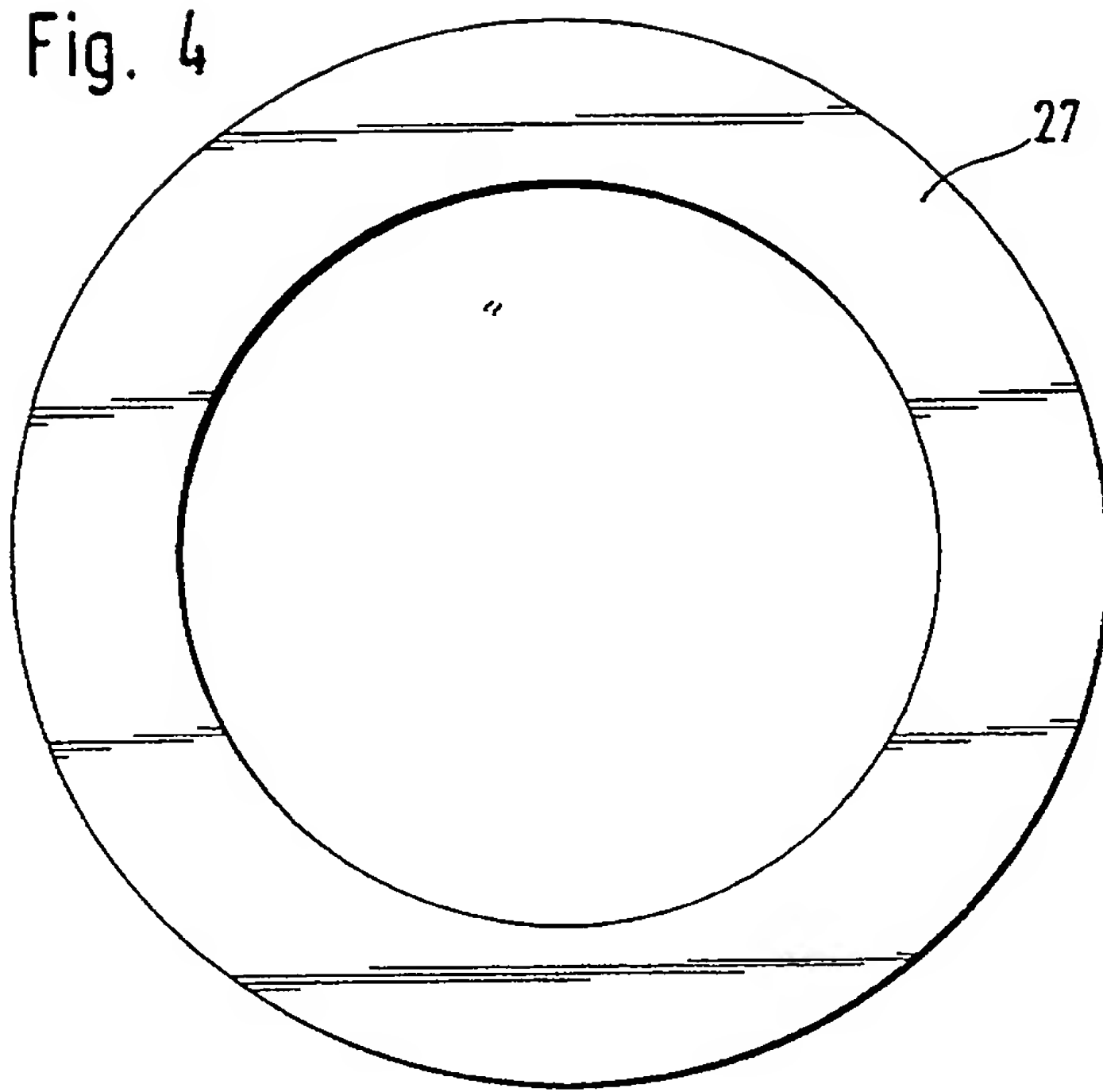


Fig. 5

